

広域な地震波動伝播の予測手法

構造物技術研究部 耐震構造
主任研究員 室野剛隆

1. はじめに

地震時の鉄道システムの安全性を向上させるためには、地盤～構造物～車両の挙動を解明し、それに応じて適切な対策を施さなければならない。そのためには、①地震動（地盤の揺れ）を合理的に予測する解析技術、②構造物の揺れを精度よく評価できる解析技術、③構造物上を走行する車両の挙動を精度良く評価できる解析技術、が必要となるが、本報告では、上記の①について、鉄道総研で実施している最新の研究内容を紹介する。

2. 解析手法が具備すべき条件

地震とは、地殻を構成する岩盤で生じた破壊に伴って地震波動が発生し、それが地表面へと伝播して構造物などを振動させる自然現象である（図1）。よって、地震動は、断層においてどのような破壊が発生したのか（震源特性）、生じた地震波がどのように地殻内を伝わるのか（伝播経路特性）、対象地点の地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けるか（サイト特性）によって支配される。これらのことを考えると、解析手法としては以下のことを反映させる必要がある。

- A. 震源断層を含めた数 10～100km オーダーの領域（岩盤）をモデル化し、地震動が伝播してくる過程を考慮する。
- B. 堆積層では局所的な形状や物性の変化、土の非線形化の影響を受けて、地震動の特性が大きく変化するので、この影響を適切に考慮しなければならない。また、新幹線の走行速度と地震動の継続時間を考えると、解析領域は 0.5～1km 程度が必要。

しかし、上記の2つの事項を同時に満足

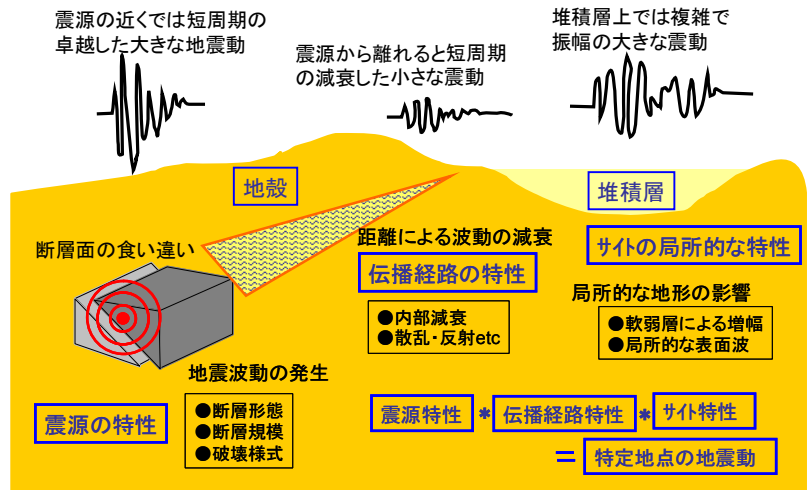


図1 地震動の発生から地表に到達するまでの模式図

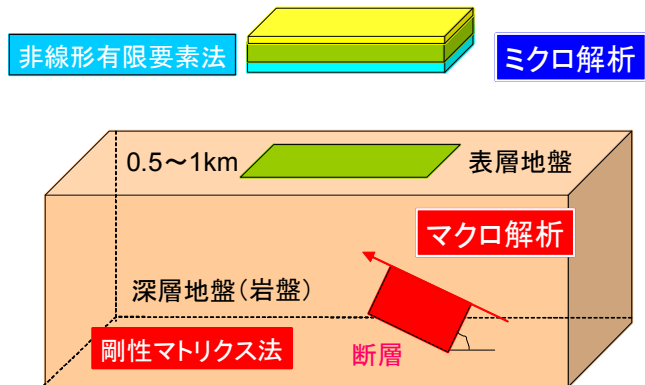


図2 解析手法のイメージ

するのは非常に難しい。そこで、上記 A と B をそれぞれ独自にモデル化し、お互いをカップリングさせることで、全体を考慮した地震動を予測することとした。概念図を図 2 に示すが、A を対象にした解析をマクロな解析、B を対象にした解析をミクロな解析と呼ぶこととする。

3. 断層を含む広域な波動伝播解析（マクロな解析）

3.1 解析手法

断層を含む広域な地震波動の伝播を解析する手法としては、有限差分法などが適用されることが多いが、ここでは剛性マトリクス法¹⁾を採用した。剛性マトリクス法は、計算速度や安定性の面で有利であり、パラメータスタディーなどに適している。ただし、その適用が水平成層のみに限定されるが、実際には、深層構造の調査精度・モデル化精度を考えれば、水平成層と考えると工学的な扱いとしては十分な場合が多いと考えている。

剛性マトリクス法は、地盤は水平成層に、断層の破壊は地盤に作用する外力としてそれぞれモデル化し（図 3）、断層を含む地盤全体系の剛性マトリクスを導いて、断層永久変位を含む地震動波形を理論的に合成する方法である。振動数-波数領域で誘導された上記の剛性方程式を解いて、地表面変位を求める。上記の解析解を 3 重フーリエ変換することにより、任意の点の地震動変位波形を効率的に計算することが可能である。なお、震源時間関数は、複雑な震源過程を考慮したモデル²⁾を採用した。

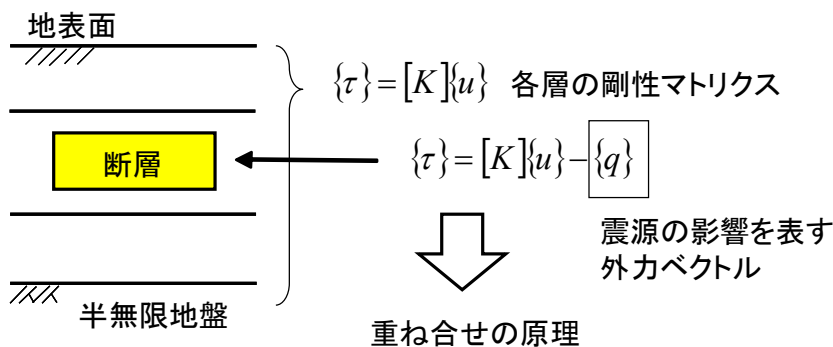


図 3 剛性マトリクス法の概略手順

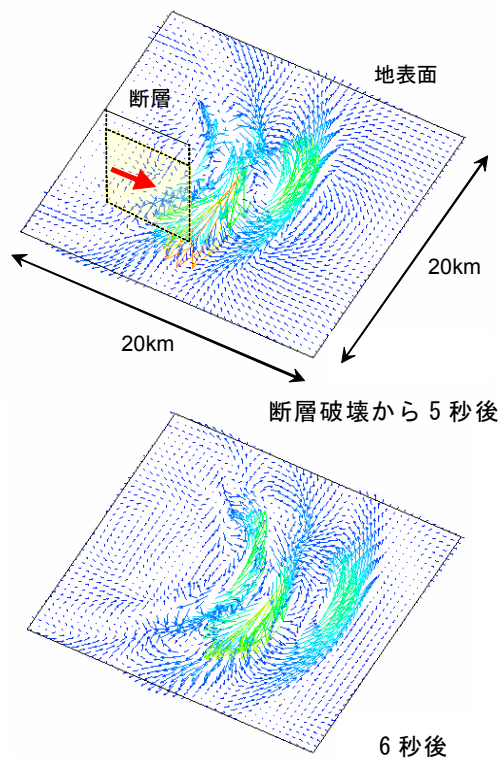


図 4 地表面における速度成分の時間的・空間的変動

3.2 計算例

図 4 は断層の大きさが 8.5km×8.5km の横ずれ断層を対象として、地震動の時間的・空間的変動をシミュレーションした例である。地表面に時計回りと反時計回りの渦が現れ、その渦が断層の破壊方向に伝播しており、その結果、数 100m の領域で逆方向に大きい振幅が現れるなど、複雑な空間分布となっている。

4. 浅層地盤領域の解析（ミクロな解析）

4.1 解析手法

局所的な地形、地盤物性の変化、地盤の塑性化を考慮できる手法として、非線形有限要素法 (FEM) を適用することとした。特に重要なのは、土は塑性化しやすい材料であり、その影響により地震動は大きく変化することから、地盤の構成則 (土の応力～ひずみ関係) の高精度化を図っている。また、1km 範囲の領域を非線形解析することから、演算処理の高速化も重要な課題であり、マトリクス計算と収束計算の改良を行っている。

4.2 土の非線形構成則 (応力～ひずみ関係)

これまで、多くの土の構成則が提案されているが、必ずしも実際の土の要素試験の結果得られる動的変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係) を満足することができない。また、履歴曲線に Masing 則を適用していることに

より、常に紡錘型の履歴形状を示す。しかし、実際の土は、図 5 に示すようにひずみが小さい間は、 $\tau \sim \gamma$ 関係は典型的な紡錘型の形状になっているが、ひずみがある程度大きくなると、 $\tau \sim \gamma$ 関係はスリップ状の形状を示していることである。そ

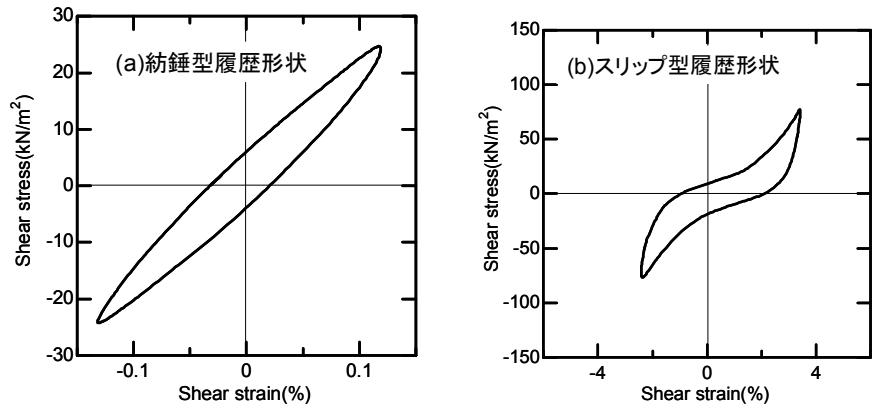


図 5 室内試験で得られた土の応力～ひずみ関係の例

の結果、ひずみが 1% を越えたあたりから、履歴減衰が大きくならずに減少する傾向がある。

そこで、GHE-S モデルを開発した³⁾。このモデルは、骨格曲線は、微小ひずみからピーク強度に至るまで広いひずみ領域で実験値にフィッティング可能なモデルとして、Tatsuoka and Shibuya が提案したモデル一般化双曲線モデル (GHE) を用いるとともに、履歴モデルは、Masing 則を改良して適用することとした。

一般化双曲線で表現されたせん断応力 τ ～ せん断ひずみ γ 関係は、式(1)で表される。

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\gamma}{\gamma_r} \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \quad (1)$$

ここに、 γ_r は規準ひずみ、 $C_1(x)$ 、 $C_2(x)$ は補正係数で以下の式によって与えられる。

$$C_1(x) = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha/x + 1} \right\} \quad (2)$$

$$C_2(x) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta/x + 1} \right\}$$

このモデルには、 $C_1(0)$ 、 $C_2(0)$ 、 $C_1(\infty)$ 、 $C_2(\infty)$ 、 α 、 β という 6 個のパラメータが存在するが、これらパ

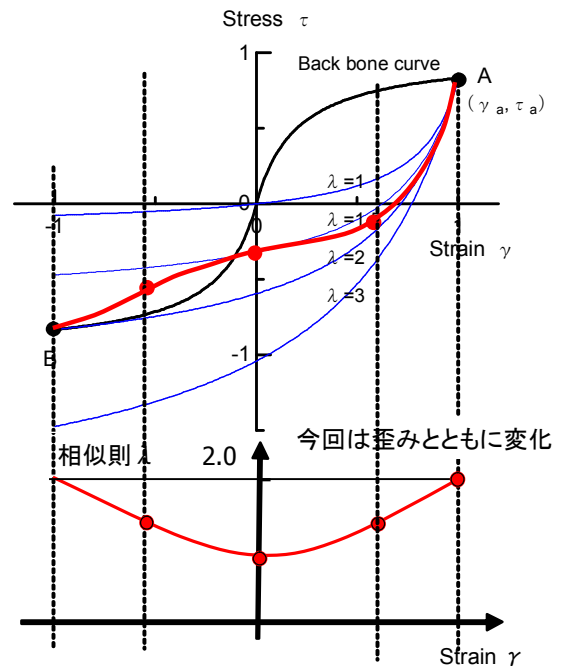


図 6 Masing 則の改良

ラメータは、繰り返し载荷試験から得られた $G/G_{max} \sim \gamma$ から算定可能である。

次に、履歴側に関しては、Masing 則の相似比に着目した。一般に、Masing 則では、図 6 に示すように骨格曲線から応力～ひずみ関係が反転すると、骨格曲線を相似比 2 倍で拡大した履歴を辿ることにより、原点に関して対称な点を目指すように設定される。しかし、本研究では、この相似比 λ を繰り返し载荷試験から得られた $h \sim \gamma$ 関係を満足するように、せん断ひずみ γ に応じて変化させることにより、室内試験から得られた実際の土の非線形特性を精度良く追跡することが可能になると言える。

4.3 計算例

本レジュメでは紙面の都合で、多くの計算例を示すことができないので、代表的な例を示す。図 7 は不整形地盤における解析事例である。鉄道構造物の過去の地震被害で、同じような構造形式が連続する高架橋の中で、局所的に数ブロックの構造物のみが被害を受けている事例がある。これらについては、地盤の不整形性により地震動が局所的に増幅したことが要因の 1 つであったことが分かっている。図 7 はその様子を顕著に表した例であり、基盤（固い地盤）が傾斜し、その深さが徐々に変化すると、局所的に加速度が著しく大きい範囲が生じている。これは、鉛直下方から伝播してきた直達波と傾斜部で生成されて水平方向に伝播する表面波が、ある地域において増幅的干渉をするためである。

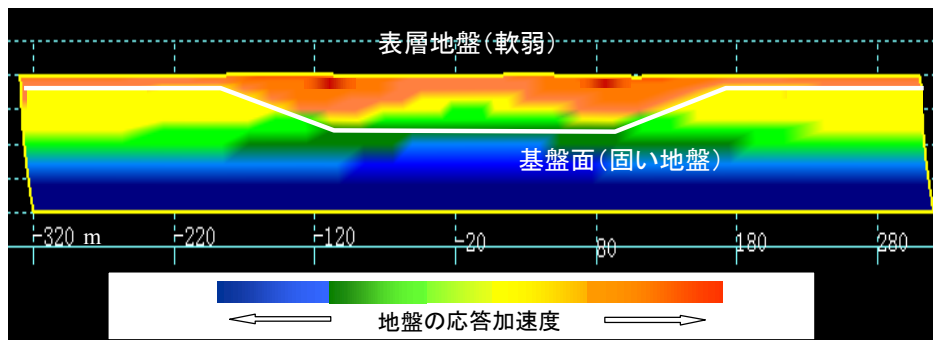


図 7 不整形地盤における地震動の解析事例

5. まとめ

本報告では、地震時の構造物や走行車両の安全性を議論する上で必要不可欠な地震動の予測方法について、断層から基盤までの地震波動の伝播をマクロな解析により捉え、その基盤での地震動（基盤入射波）により表層地盤がどのように揺れるかをきめ細かく考察するミクロな解析の 2 つを紹介した。今後とも精度向上を目指し、現象解明を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 原田隆典、王宏沢：剛性マトリクスによる水平成層地盤の波動解析、地震、第 57 巻、pp.387-392、2005.
- 2) 中村洋光、宮武隆、断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式、地震 第 53 巻、pp.1-9、2000.
- 3) 室野剛隆、野上雄太：S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係、第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集、2006.